

Algoritmo para el Análisis del Comportamiento de Fresas Periféricas en Condiciones Variables

Hilde Perez¹, Eduardo Diez², Mario Guzmán², Antonio Vizán³

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica, Univ. de León (España). (2) Dpto. de Ingeniería Mecánica, Univ. de La Frontera, Temuco (Chile). (3) Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Universidad Politécnica de Madrid (España)
(hilde.perez@unileon.es)

RESUMEN

La simulación de procesos de mecanizado supone hoy en día una herramienta de gran interés para predecir el comportamiento de la herramienta en las operaciones de corte y por lo tanto, la posibilidad de optimizar estas operaciones, permitiendo alcanzar una mayor productividad en los procesos de fabricación. Los algoritmos que actualmente se están utilizando para la predicción de fuerzas de corte son variados y su eficiencia diferente. La mayoría de los algoritmos desarrollados se centran en determinar la evolución de las fuerzas de corte en cada vuelta de la herramienta sin variar las condiciones de mecanizado en este intervalo. En este sentido, se ha desarrollado un algoritmo para fresado periférico basado en el espesor de viruta medio, que permite simplificar el algoritmo de estimación de fuerzas y ser ejecutado con una mayor velocidad, manteniendo el mismo nivel de precisión en la estimación. Con este nuevo modelo es posible realizar la estimación de fuerzas en fresado no solo cuando las condiciones de corte son uniformes sino también cuando se producen cambios en la configuración del corte.

INTRODUCCIÓN

Los estudios de los procesos de fresado se han centrado sobre todo en el análisis de las fuerzas de corte en situaciones de mecanizado uniformes, donde los parámetros de corte no varían durante el desarrollo del proceso (Abrari & Elbestawi, 1997) (Koenigsberger & Sabberwal, 1960) (Tlustý & MacNeil, 1975).

Sin embargo, es frecuente que se produzcan variaciones en las que las condiciones de corte se ven modificadas respecto de las que en principio se habían previsto (Pérez, 2012). Las publicaciones que hacen referencia a situaciones de corte uniforme son numerosas, sin embargo los trabajos encontrados que hagan referencia a este tipo de situaciones especiales de corte son menos frecuentes.

La estimación de las fuerzas de corte en el mecanizado de esquinas ha sido de interés para algunos autores como (Zhang & Zheng, 2004) que presentan la estimación de fuerzas de corte para el caso de esquinas circulares donde resuelve el problema haciendo una discretización de la geometría de la esquina en una serie de segmentos de corte uniforme. Yun (Yun, Ko, Lee, Cho, & Ehmann, 2002) presenta la estimación y el análisis de las fuerzas de corte para situaciones de transición en el mecanizado de esquinas.

Frecuentemente durante el mecanizado, el ancho de corte o la profundidad de corte pueden variar. Las variaciones más frecuentes en este sentido son aquellas que corresponden a

variaciones de las sobredimensiones de las piezas en bruto, la existencia de agujeros, ranuras, el mecanizado de esquinas, las entradas y salidas de la herramienta en el material, etc.

Estos cambios se hacen todavía más evidentes cuando se trata de microherramientas, donde errores dimensionales de la pieza o errores de alineación sobre la máquina pueden producir variaciones significativas del ancho de corte.

Estas situaciones pueden comprometer la integridad de la herramienta o dar como resultado un mecanizado deficiente en relación con su dinámica o su deformación. Por este motivo, es de interés analizar el comportamiento de las herramientas, en concreto de las fresas periféricas, ante variaciones del ancho de corte de forma que sea posible predecir con la máxima precisión las condiciones en que se va a desarrollar el mecanizado.

Se presenta con este trabajo el algoritmo desarrollado para la estimación de fuerzas en fresado. Además de desarrollar el algoritmo básico, ha sido necesario desarrollar otros algoritmos que determinen el modo de corte de cada filo, la longitud del filo que corta en cada instante, su posición relativa en cada revolución de la herramienta y las posiciones angulares de entrada y salida del mismo en la pieza.

MODELO DE ESTIMACIÓN DE FUERZAS DE FRESADO

El modelo desarrollado se basa en la utilización del espesor medio de viruta de la longitud del filo que en cada momento está cortando (Perez, Diez, Marquez, & Vizan, 2013). De esta manera, para cada posición de la herramienta a lo largo de su rotación, se realiza un único cálculo de la fuerza de corte, en vez de un conjunto de cálculos cuyo número depende de la discretización que se haya hecho del filo. Así, las expresiones de la fuerza tangencial y la fuerza radial serán:

$$F_t(\varphi) = k_t(\varphi) \cdot a_p \cdot \bar{h}(\varphi) \quad (1)$$

$$F_r(\varphi) = k_r(\varphi) \cdot a_p \cdot \bar{h}(\varphi) \quad (2)$$

El espesor de viruta medio para el ángulo del arco del filo en contacto en cada instante con la pieza, denominado ángulo del filo proyectado ($\varphi_1 - \varphi_2$) es:

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f_z \sin \varphi_j d\varphi = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (3)$$

Esto hace que sea posible, en un solo cálculo, conocer el valor de la fuerza de corte en un instante dado.

Ángulo de empañe

$$\varphi_{em} = \varphi_s - \varphi_e$$

Ancho de corte

$$a_e = R + R \cdot \cos \varphi_e$$

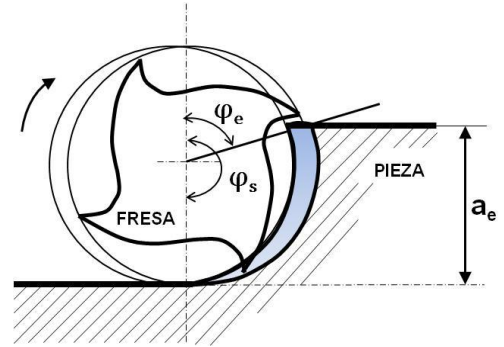


Figura 1. Definición del ángulo de empañe y ancho de corte en fresado

Los parámetros que van a caracterizar el perfil de fuerzas son el ángulo proyectado del filo φ_{pr} , que corresponde a la proyección sobre el plano XY del filo de corte en contacto con el material. Este ángulo está relacionado con el ángulo de inclinación del filo de corte λ_s de la siguiente forma:

$$\varphi_{pr} = \frac{2 \cdot \tan \lambda_s \cdot a_p}{D} \quad (4)$$

A medida que el filo avanza en el corte, figura 2, la longitud de la arista en contacto con el material irá progresando por las distintas zonas de corte. Inicialmente, en la zona de transición de entrada, el valor del espesor de viruta medio es:

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_j - \varphi_e} f_z (\cos \varphi_e - \cos \varphi_j) \quad \text{for } \varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_e + \varphi_{pr} \quad (5)$$

La profundidad de corte a_{pv} es variable en este tramo y se determina a partir de la ecuación 6.

$$a_{pv}(\varphi) = \frac{\varphi_j - \varphi_e}{\varphi_{pr}} a_p \quad \text{para } \varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_e + \varphi_{pr} \quad (6)$$

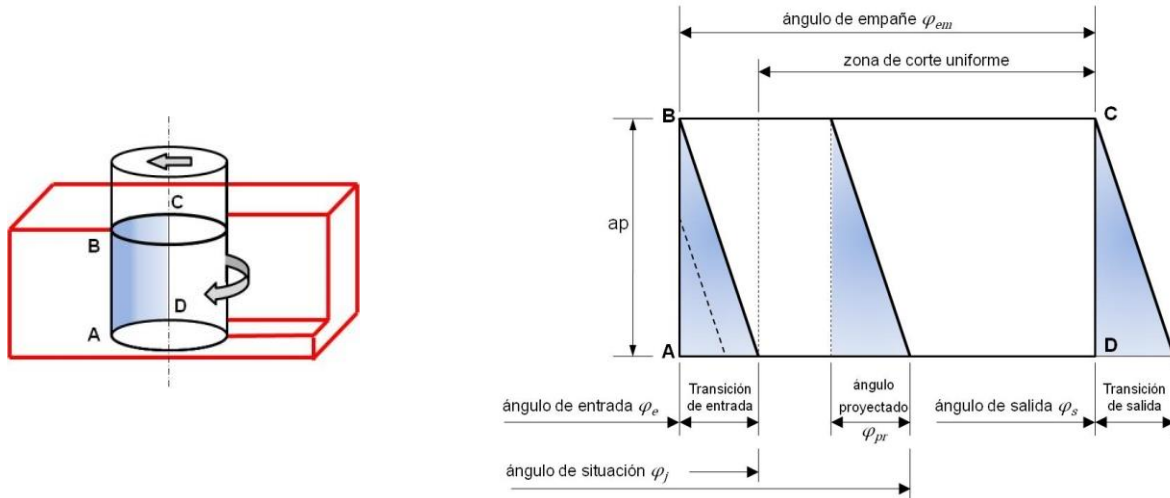


Figura 2. Desarrollo de la superficie de contacto pieza-herramienta

La amplitud de esta zona de transición es función del ángulo proyectado del filo de corte φ_{pr} . La profundidad de corte aumenta hasta que φ_j alcanza el límite superior del intervalo $\varphi_e + \varphi_{pr}$, en el punto B, figura 2. A partir de ese instante el filo entra en una zona, que se ha denominado de corte uniforme, donde no hay cambio en el valor de la profundidad de corte. Las fuerzas de corte, sin embargo, irán variando como consecuencia de la variación del espesor de viruta, que se determina según la ecuación 7.

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_j - (\varphi_j - \varphi_{pr})} f_z (\cos (\varphi_j - \varphi_{pr}) - \cos \varphi_j) \quad \text{for } \varphi_e + \varphi_{pr} < \varphi_j \leq \varphi_s \quad (7)$$

Esta situación se mantiene hasta alcanzar el punto D. A partir de aquí, el filo empieza a salir progresivamente hasta C, que es el punto de salida. En esta zona de transición de salida las expresiones son análogas a las que se tenía para la transición de entrada. El espesor de viruta se calcula según la ecuación 8.

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_s - (\varphi_j - \varphi_{pr})} f_z (\cos (\varphi_j - \varphi_{pr}) - \cos \varphi_s) \quad \text{for } \varphi_s < \varphi_j \leq \varphi_s + \varphi_{pr} \quad (8)$$

La expresión para la profundidad de corte adopta la forma siguiente:

$$a_{pv}(\varphi) = \frac{\varphi_s - (\varphi_j - \varphi_{pr})}{\varphi_{pr}} a_p \quad \text{para } \varphi_s \leq \varphi_j \leq \varphi_s + \varphi_{pr} \quad (9)$$

De esta forma se evita realizar el cálculo del espesor de viruta instantáneo para cada punto del filo empañando el material. Las componentes en X e Y de la fuerza de corte sobre la herramienta se determinan según las siguientes expresiones:

$$F_{x_j}(\varphi) = F_t(\varphi) \cdot \cos \varphi_m + F_r(\varphi) \cdot \sin \varphi_m \quad (10)$$

$$F_{y_j}(\varphi) = -F_t(\varphi) \cdot \sin \varphi_m + F_r(\varphi) \cdot \cos \varphi_m \quad (11)$$

El punto de aplicación de estas fuerzas se ha situado en el punto medio del arco de contacto del filo con la pieza φ_m . La diferencia entre esta posición y la real es muy reducida, como consecuencia de que la variación de la presión específica en este intervalo puede considerarse lineal. Este ángulo φ_m toma diferentes valores según en qué zona se encuentre el filo:

$$\varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_e + \varphi_{pr} \quad \varphi_m = \varphi_j - \left(\frac{\varphi_j - \varphi_e}{2} \right) \quad (12)$$

$$\varphi_e + \varphi_{pr} < \varphi_j \leq \varphi_s \quad \varphi_m = \varphi_j - \left(\frac{\varphi_{pr}}{2} \right) \quad (13)$$

$$\varphi_s < \varphi_j \leq \varphi_s + \varphi_{pr} \quad \varphi_m = \varphi_s - \left(\frac{\varphi_s - (\varphi_j - \varphi_{pr})}{2} \right) \quad (14)$$

Atendiendo a la relación del valor del arco de empañe con el ángulo proyectado de la herramienta, pueden darse las siguientes situaciones:

- Si $\varphi_{em} > \varphi_{pr}$, puede haber más de un filo de la herramienta cortando simultáneamente material. El número de filos se puede deducir de:

$$nZ = \left(\frac{\varphi_{em} + \varphi_{pr}}{\frac{2\pi}{N_z}} \right) \quad (15)$$

- Si $\varphi_{em} = \varphi_{pr}$, un solo filo de la herramienta está cortando material.
- Si $\varphi_{em} < \varphi_{pr}$, solo un filo corta material pero éste no llega a alcanzar nunca el corte uniforme. El filo está siempre en zona de transición y por lo tanto, entrando o saliendo de la pieza.

MECANIZADO EN CONDICIONES VARIABLES

En una situación de condiciones variables de mecanizado, el arco de empañe es la base para el cálculo de las fuerzas de corte. Para ello es preciso determinar en cada momento los ángulos de entrada y salida del filo de la herramienta en el material. En estas condiciones variables, estos ángulos varían para cada posición del filo en cada una de las vueltas de la herramienta.

La condición de partida en la determinación de la geometría del proceso es la posición inicial de la herramienta respecto de la pieza a mecanizar x_p e y_p (figura 3). Por lo tanto se trata del desplazamiento de aproximación que debe realizar la herramienta hasta hacer contacto con la pieza e iniciar el corte. En cada vuelta, el desplazamiento lineal de aproximación hacia la pieza es

igual al avance por filo f_z . El número de vueltas que efectúa la herramienta hasta que se produce el contacto con la pieza es num_rot :

$$num_rot \geq \left(\frac{x_p - R}{f_z} \right) \quad (16)$$

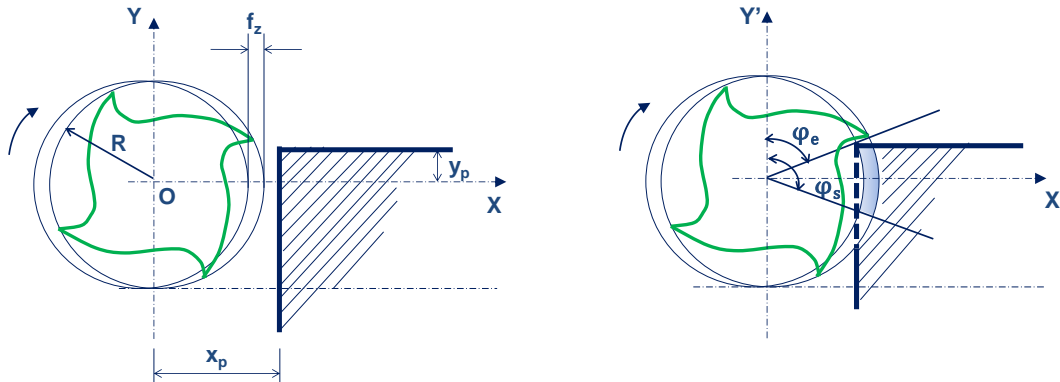


Figura 3. Estimación de los ángulos de entrada y salida de la herramienta

Dentro de las múltiples condiciones de corte variable que se pueden dar, una que se da con mucha frecuencia, es la que se produce cuando la herramienta inicia el mecanizado de una superficie, como se recoge en la figura 4. En esta situación, la fresa entra progresivamente en el material de la pieza de forma que en cada vuelta aumenta el arco de empañe hasta que se alcanza completamente el ancho de corte nominal.

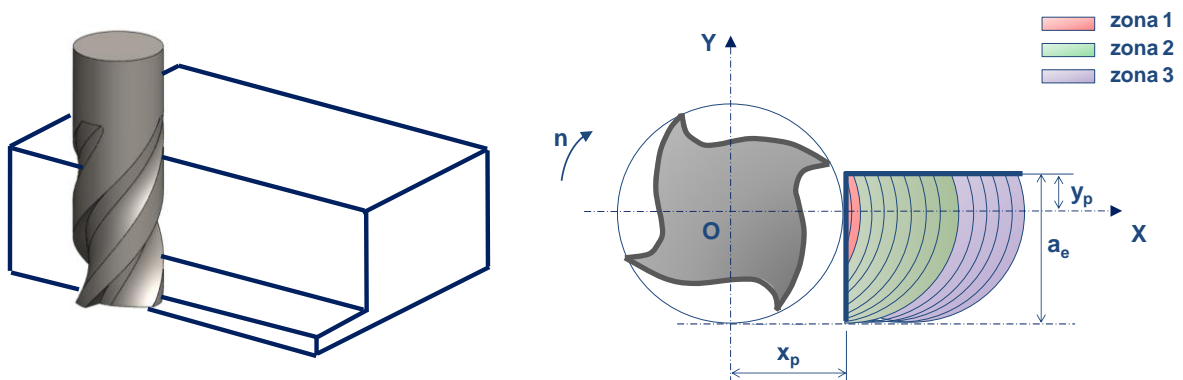


Figura 4. Entrada de la herramienta en la pieza por primer cuadrante

Como se puede apreciar en la figura 4, la herramienta entra en la pieza (zona 1), iniciando el corte por su parte frontal, posteriormente el corte continúa por la parte superior de la pieza (zona 2) y

cuando el centro de la herramienta ha rebasado la cota x_p , se alcanza el arco de empañe completo (zona 3). La geometría del proceso difiere sustancialmente si el punto de entrada del filo se realiza por encima del centro de la herramienta o por debajo. En el primer caso el espesor de viruta crece y en el segundo se alcanza el máximo valor a la entrada y posteriormente decrece. Todo ello depende del grado de inmersión de la herramienta en el material (a_e/D) y de la ordenada de la superficie de la pieza, de manera que se tienen dos casos cuyas ordenadas son:

$$y_1(\omega, t) = +\sqrt{R^2 - [x_p - x_h(\omega, t)]^2} \quad (17)$$

$$y_2(\omega, t) = -\sqrt{R^2 - [x_p - x_h(\omega, t)]^2} \quad (18)$$

donde $x_h(\omega, t)$ es variable en el tiempo y función de la velocidad de avance V_a :

$$x_h(\omega, t) = x_0 + V_a \cdot t = x_0 + f_z \cdot n \cdot N_z \cdot t \quad (19)$$

con x_0 como la posición del centro de la herramienta para $t = 0$. Los ángulos de entrada y salida correspondientes serán:

$$\varphi_e(\omega, t) = \cos^{-1} \left(\frac{y_1(\omega, t)}{R} \right) \quad (20)$$

$$\varphi_s(\omega, t) = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{y_2(\omega, t)}{R} \right) \quad (21)$$

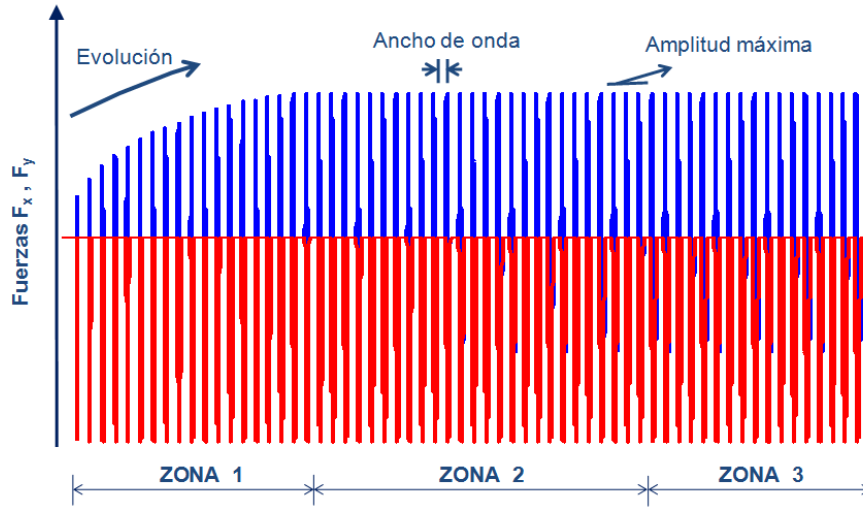


Figura 5. Evolución general de las fuerzas en corte variable

En la figura 5 se recogen las fuerzas de corte proyectadas F_x y F_y para el caso presentado. La evolución de estas fuerzas queda caracterizada por su amplitud, la variación de la amplitud con el tiempo y el ancho de la onda generada.

La amplitud máxima es el valor máximo de las fuerzas de corte y es función del arco de empañe y del punto de entrada del filo en el material. La evolución de las fuerzas de corte hasta alcanzar la región de corte uniforme es función del arco de empañe, del ángulo proyectado del filo, del punto de entrada del filo en el material y de la posición relativa de la herramienta con respecto a la pieza, mientras que el ancho de la onda depende del arco de empañe y del punto de entrada del filo en el material.

En la figura 5 se indican estas características así como el gráfico de las fuerzas de corte obtenido. En ella se diferencian tres zonas de corte. La primera corresponde a la entrada en transición del filo en el material, en la que el arco de empañe aumenta con el avance de la herramienta, hasta que se alcanza la cota y_p de la pieza o lo que es lo mismo, hasta que el ángulo de entrada alcanza el valor correspondiente a corte uniforme. La segunda zona corresponde también a una situación transitoria y abarca desde el final de la zona 1 hasta que la herramienta alcanza la cota x_p de la pieza, es decir, se alcanza la condición uniforme para el ángulo de salida. La tercera zona corresponde a una situación de corte uniforme con los ángulos de entrada φ_e y salida φ_s correspondientes al empañe constante. Se puede observar también en esta figura que los valores máximos de las fuerzas se alcanzan rápidamente, debido a que el punto de entrada de la herramienta es próximo al ángulo para el valor máximo de la fuerza de corte (figura 6).

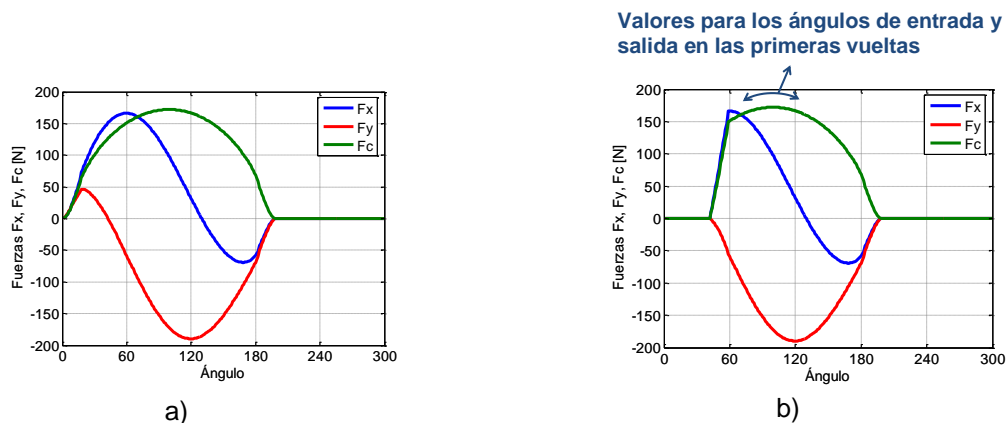


Figura 6. Fuerzas de corte para una operación de a) ranurado, b) entrada por primer cuadrante con $\varphi_e = 41^\circ$ y $\varphi_s = 180^\circ$ en corte uniforme

En la figura 7 se representan las distintas zonas de evolución características de las fuerzas que se generan durante la entrada de la herramienta en la pieza. En la zona 1 se observa cómo las amplitudes van aumentando hasta alcanzar el valor máximo. En esta zona el arco de empañe va creciendo y, por tanto, el ancho de la onda también crece.

En la zona 2 se observa que los valores absolutos de las fuerzas F_x y F_y se han estabilizado en sus máximos. El ancho de la onda sigue creciendo conforme lo hace el arco de empañe. Esto da lugar a que el valor mínimo de la fuerza F_x vaya siendo más negativo.

En la zona 3 se ha alcanzado la regularidad del mecanizado y tanto las amplitudes como los anchos de las ondas se mantienen constantes. En esta zona, la salida del filo de la herramienta se realiza con un valor de espesor de viruta nulo y esto da lugar, por tanto, a un corte más estable y un menor desgaste de los filos.

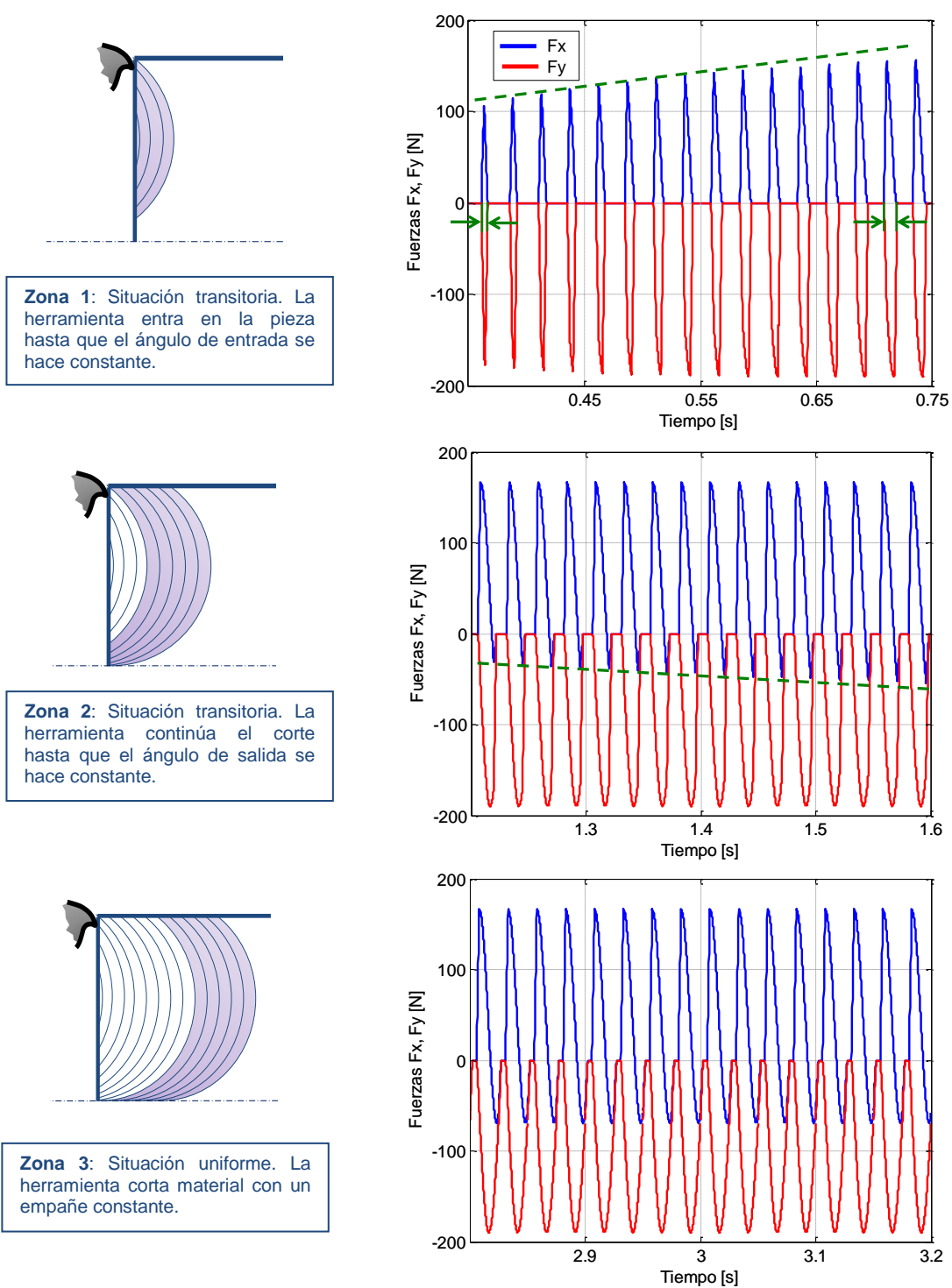


Figura 7. Distintas zonas de evolución para la entrada de la herramienta en la pieza.

CONCLUSIONES

El modelo de fuerzas desarrollado permite estimar las fuerzas de corte cuando las condiciones de mecanizado varían a la vez que se está realizando la operación de mecanizado.

Para ello, además del cálculo de las fuerzas es necesario calcular para cada instante la geometría del corte, lo que supone obtener el arco de empañe y el modo de corte de cada uno de los filos.

Los resultados mostrados muestran que las fuerzas de corte obtenidas siguen la evolución de los parámetros de una forma eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de La Frontera a través del proyecto DI13-0018 y por la Universidad Politécnica de Madrid a través del proyecto AL13-RT-06.

REFERENCIAS

Abrari, F., & Elbestawi, A. (1997). Closed form formulation of cutting forces for ball and flat end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* , 37 (1), 17-27.

Koenigsberger, F., & Sabberwal, A. (1960). Chip section and cutting force during the milling operation. *Annals of the CIRP* .

Pérez, H. (2012). Influencia de la variación de las condiciones de mecanizado en el fresado periférico. *Tesis* .

Perez, H., Diez, E., Marquez, J., & Vizan, A. (2013). An enhanced method for cutting force estimation in peripheral milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (DOI: 10.1007/s00170-013-5153-0).

Thusty, J., & MacNeil, P. (1975). Dynamic of cutting forces in end milling. *Annals of the CIRP* , 24 (1), 21-25.

Yun, W., Ko, J., Lee, H., Cho, D., & Ehmann, K. (2002). Development of a virtual machining system, part 3: cutting process simulation in transient cuts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 1617–1626 , 42, 1617-1626.

Zhang, L., & Zheng, L. (2004). Prediction of cutting forces in milling of circular corner profiles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* , 44, 225-235.